

마이크로 채널 내 Droplet 형성에 따른 내·외부 유동장 동시측정

김경천[†] · 김재민* · 윤상열*

Simultaneous Measurement of Internal and External Flow Fields around the Droplet Formation in a Microchannel

Kyung Chun Kim, Jae Min Kim and Sang Youl Yoon

Abstract

This experiment has been carried out to measure the process of droplet formation between water phase fluid(PVA 3%) and organic phase fluid(oil). Internal and External flow fields measured by a Dynamic Micro-PIV method. Water-in-oil(W/O) droplets successfully generated at a cross junction and Y junction. Internal and external flow fields were measured when the droplet grew up, stretched and separated.

Key Words : Cross-junction microchannel(십자형 마이크로 채널), Y-junction microchannel(Y형 마이크로 채널), Two-phase flow(2상 유동), Micro-PIV measurement(마이크로 입자영상유속 측정), Droplet formation

1. 서론

최근 MEMS(micro-electromechanical systems)기술의 발달로 인하여 마이크로 단위의 구조물의 제작이 가능해짐에 따라서 미세유체소자(microfluidics)에 대한 관심이 증대하고 있으며 많은 연구들이 Lab-on-a chip 과 μ -TAS(Micro Total Analysis System)등에 많이 응용되고 있다.

분석시스템의 각 요소를 MEMS 기술에 의해 초소형화하여 기판 위에 집적시키면 시스템의 소형화, 비용절감, 무효체적의 감소가 가능하다. 또한 계측에 필요한 샘플이나 시약의 양을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 분석과정에서 발생하는 폐액량도 절감할 수 있다. 이 외에도 측정시간의 단축과 시

스템 전체의 에너지 소모량 절감효과의 이점도 가지고 있다.

미세유체소자(microfluidics)를 이용한 시스템은 크게 continuous-flow 구조와 droplet-based 구조 두 가지 경우로 분류된다. 대부분의 미세유체소자는 액체의 continuous-flow 을 위하여 압력이나 전극의 전압에 의한 기계적, 전기적인 힘에 의한 펌프작용에 의해서 이송된다. 그러나 제작이 복잡하며 유체를 다른 위치로 이송하기 위해서는 높은 전압과 압력을 요구한다. 반면에 droplet-based 구조는 continuous-flow 구조보다 제작이 간단하며 유체를 다른 위치로 이송하기 위해서 작은 전압과 압력을 요구하므로 최근 들어 droplet-based 구조에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

현재 에멀션(emulsion)제조 대부분의 방법은 단일관내에 있는 두 섞이지 않는 액체를 구성하는 유체 혼합 영역에서의 난류의 형성에 의존한다. Droplet-based 구조는 서로 혼합되지 않는 organic phase fluid 와 water phase fluid 를 이용하여 T 자형 또는 Y 자형 마이크로채널에서 표면장력과 계면전단응력을 이용하여 균일한 크기의 droplet 형성에 관한 연구가 이루어졌다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

[†] 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

* 부산대학교 기계공학과 대학원

Droplet-based 구조의 가장 큰 장점은 미세유체소자에서 혼합작용(mixing)을 수행할 수 있다는 점이다. 일반적인 혼합작용은 큰 난류유동이 요구되지만 미세유체소자에서는 낮은 레이놀드수로 인해 층류유동이 형성되어 혼합이 어렵게 된다. 또한 일반적으로 Y 자형 마이크로채널이 마이크로 믹서 등에 널리 이용되고 있는 미세유체소자 중 하나이지만, 갈라진 두 채널로부터의 두 유체가 유입되고 하나의 채널로 합쳐지게 되는 데 낮은 확산성에 의해 채널과 평행하게 유체들은 흐르게 되고 혼합은 아주 느리게 이루어지게 된다. 이러한 혼합작용을 효과적으로 이루어지게 하기 위해 개별적인 droplet 에서 혼합작용을 발생시키는 연구가 이루어졌다. 이러한 현상은 Y 형 마이크로 채널에서 일어나는 일반적인 혼합 기술과는 근본적인 차이가 있다.

또한 최근 개별적으로 나누어진 droplet 을 기반으로 한 디지털 미세유체소자(digital microfluidics) 개념이 새로운 패러다임으로 제기되고 있다. 디지털 미세유체소자의 공정은 단위 사이즈화된 다발들의 이송, 저장, 혼합, 반응, 분석 등이 개별/독립적으로 이루어지게 된다. 따라서 표준화된 여러 개의 공정이 동시에 이루어지는 것을 의미한다.⁽⁴⁾

본 실험에서는 PDMS 로 제작된 두 종류의 마이크로채널 즉 십자형 마이크로채널과 Y 자형 마이크로채널 채널에서 서로 혼합되지 않는 organic phase fluid(oil)과 Water phase fluid(PVA 3%)에 의해 생성되는 W/O droplet 에 대해서 실험하였다. 또한 Micro-PIV 기법을 적용하여 droplet 이 생성되는 과정에서의 내/외부 유동장을 측정하여 droplet 생성 과정에서의 내/외부 유동 변화에 대하여 정확한 정보를 얻음으로써 droplet 형성 메커니즘을 파악하는데 중요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험 장치

Fig. 1 은 본 실험에 사용된 Micro-PIV 장치를 나타낸 그림이다. Micro-PIV 측정기법중의 하나인 Dynamic Micro-PIV 기법이 사용되었으며 실험장치는 형광현미경, 10bit high speed camera, 광원으로 구성되어 있다.

본 실험에서 광원은 형광현미경(BX51, Olympus) 하부에 장착되어 있는 할로겐램프에 의해 조사되었으며, 20×의 배율을 가지는 objective lens(Olympus)를 통과한 화상확대를 위해 1280×1024의 해상도와 635fps를 가지는 10bit high speed

camera(1200hs, PCO)가 사용되었다. Droplet 내부 유동장의 Micro-PIV 계측을 위해 PVA 3% 용액에는 1 μm직경의 polystyrene 입자(R0100, Duke scientific)가 Oil 에는 1 μm직경의 carboxylate-modified 입자(F8819, Molecular Probes)가 사용되었다. 마이크로 채널 내부유동의 형성을 위해 syringe pump 를 사용하였다.

Fig. 2 는 본 실험에서 사용된 마이크로채널의 형상 및 크기를 나타낸 그림이다. Inlet 1 에서는 oil(Freol ALPHA 10G)이 Inlet 2 에서는 PVA3%용액을 주입한다. 십자형과 Y 자형 두 가지 다른 형상의 마이크로 채널이 사용되었다.

Micro-PIV 측정과 가시화를 위해서 1mm 두께를 가지는 Pyrex glass 로 덮혀 있으며 채널은 polydimethyl-siloxane (PDMS)로 제작하였다.

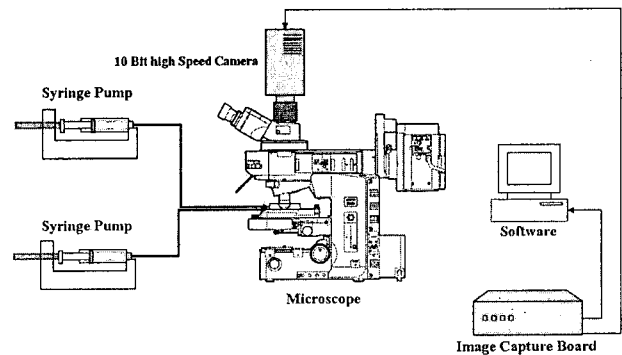


Fig. 1 Schematic of Experimental Setup

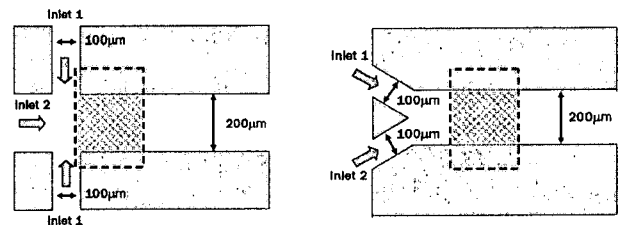


Fig. 2 Dimensions and Measurement Area

2.2 실험 조건 및 방법

십자형 마이크로채널에서는 실험조건은 Oil 0.9 μl/min, PVA3% 0.3 μl/min 이고 Y 자형 마이크로 채널의 실험조건은 Oil 3.0 μl/min, PVA3% 1.0 μl/min 이다. Fig. 3 에서는 Oil 에 Molecular probes particle 과 Duke scientific particle 혼합했을 때를 비교했다. 두 개의 Particle Oil 에 혼합한 후 sonication 시킨 후 슬라이드 글라스에 oil 에 혼합한 입자를 놓은 후 커버글라스를 덮고 찍은 이미지이다. 두 종류의 Particle 을 비교해 보았을 때 molecular probes particle 이 duke scientific particle 보다 분산이 잘 됨

을 볼 수 있다.

Table. 1은 Oil과 PVA3%의 물성치를 보여준다. 동점성계수는 capillary viscometer(SCHOTT GLAS 사, Germany)로 측정하였고 표면장력은 surface tensiometer(KSV 사의 Sigma 70, Finland)로 측정하였다.

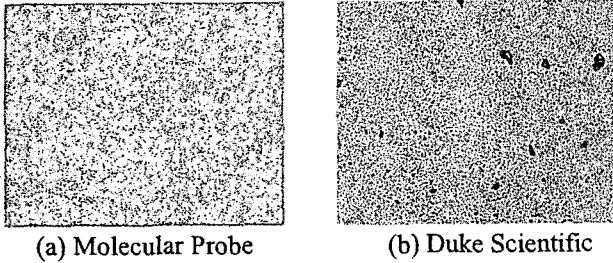


Fig. 3 1 μm Particle mixing with oil

	Oil	PVA 3%
Density(g/cm ³)	0.93	1.03
Dynamic viscosity (mm ² /sec)	24.41 (19.7 ± 0.3 °C)	10.74 (23 ± 2 °C)
Surface tension (mN/m)	25.95	44.94

Table. 1 Properties of oil and PVA3%

3. 실험 결과

Fig. 4는 십자형 마이크로채널에서 water phase(PVA 3%)의 유량은 0.9 μl/min 이고 organic phase(oil)의 유량은 0.3 μl/min 일 때 W/O droplet 형성에 대한 가시화와 이미지로부터 계산된 droplet 내/외부 유동장을 나타낸 그림이다.

Fig. 4 (a)~(b)는 두 유체의 계면장력과 droplet과 마이크로채널 벽면에서의 전단력에 의한 상호작용에 의해서 droplet이 성장하며 늘어난다. 이러한 과정에서 오일의 유량이 일정하게 유입되기 때문에 단면적이 감소하게 되면서 오일의 속도가 가속됨으로서 오일의 압력이 낮아진다는 것을 알 수 있다. 그러므로 높은 전단력과 계면장력 그리고 droplet 내부의 높은 압력과 주변 유동의 낮은 압력으로 인해 droplet이 형성된다. 그리고 droplet과 오일의 계면장력에 의해서 droplet의 내/외부 계면으로 갈수록 속도가 증가하게 된다. (c)~(d)는 특정 지점에서 droplet의 단면이 급격하게 감소하면서 droplet이 분리되는 과정이다. 이는 droplet의 늘어남, 오일유동의 막힘에 의해 강한 음압이 droplet의 후단에 발생함과 동시에 막힘에 의한 오일 유동의 높은 압력에 의한 것임을 알 수 있다. 이때

droplet의 단면이 감소하는 위치를 기준으로 전방으로는 유동방향으로 유동의 속도가 급격하게 증가하지만 후방으로는 역방향으로 유동의 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 droplet 외부 유동에서 분리되는 droplet의 아래위 벽면쪽으로 vortex flow가 형성되면서 droplet이 분리된다.

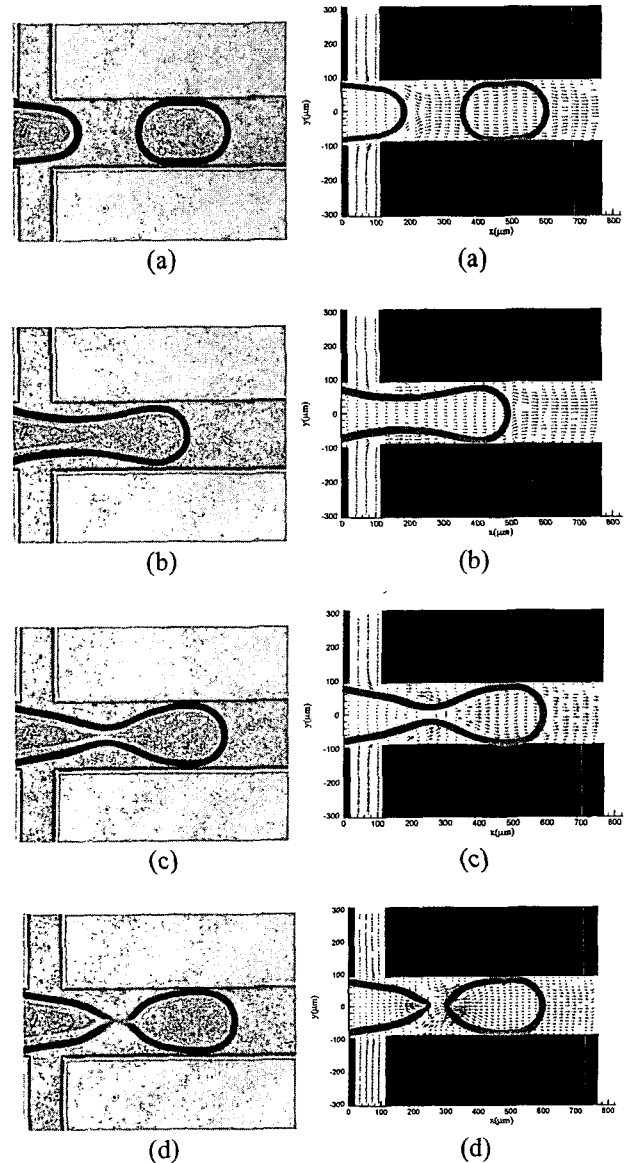


Fig. 4 Visualization and instantaneous flow field of droplet formation in a cross junction microchannel

Fig. 5은 Y자형 마이크로채널에서 water phase(PVA 3%)의 유량은 1.0 μl/min 이고 organic phase(oil)의 유량은 3.0 μl/min 일 때 W/O droplet 형성에 대한 가시화와 이미지로부터 계산된 droplet 내/외부 유동장을 나타낸 그림이다. Fig. 4의 십자형 마이크로채널에서의 droplet의 생성, 성장, 분리의 메커니즘과 동일하다. 십자형 마이크로 채널과는 달리 한쪽으로부터만 오일이 유입되기 때문에 비대칭적인

droplet 이 형성됨을 볼 수 있다. 그리고 fig. 5 의 (c)에서는 droplet 의 neck 부근과 (d)에서는 droplet 후방의 벽면과 droplet 계면 사이에 vortex 가 생성됨을 볼 수 있다.

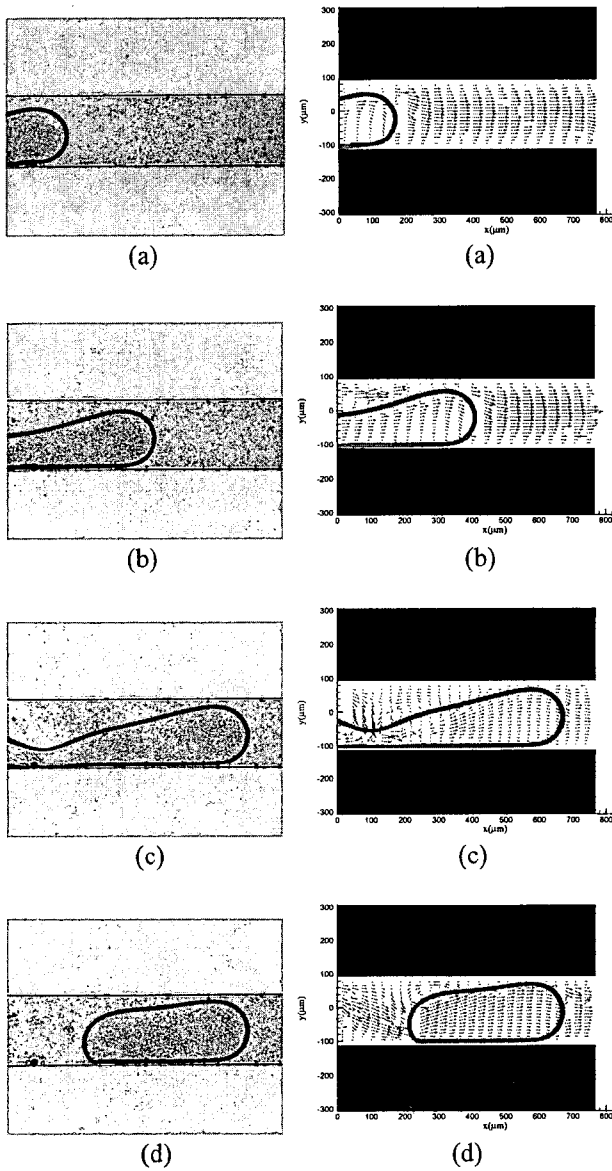


Fig. 5 Visualization and instantaneous flow field of droplet formation in a Y-junction microchannel

4. 결 론

본 연구에서는 Dynamic Micro-PIV 기법을 이용하여 PDMS 에 의해 제작된 십자형과 Y 자형의 두 종류의 마이크로채널 내부에서 water phase fluid(PVA3%)와 organic phase fluid(oil)에 의해 형성되는 W/O droplet 의 가시화 및 droplet 내/외부 유동장을 측정하였다.

Oil 에 입자를 혼합하는 것이 가능함으로써 외부

유동장의 측정이 가능하게 되었고 Droplet 이 분리될 때 순간적으로 droplet 외부에 vortex flow 가 형성됨을 관찰할 수 있었다. droplet 의 외부 유동의 속도벡터가 뚜렷하게 나타나지 않는 이유는 급격한 유동의 속도증가에 의해서 속도벡터 추적이 상당히 어려워져서 정확한 속도벡터를 산출해 내야 할 과제가 남아 있다. 실험에서 얻어진 데이터를 활용하면 Lab-on-a chip 또는 μ -TAS 등과 같은 미세 유체소자의 설계에 중요한 기초자료가 될 수 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) T. Nisisako, T. Torii and Higuchi T, 2002, "Preparation of Picoliter-sized Reaction/Analysis Chambers for Droplet-based Chemical and Biochemical Systems," Micro Total Analysis Systems, Nara, Japan, 3-7 Nov, vol.1, pp.362-367.
- 2) A. Kawai, T. Futami, H. Kiriya, K. Katayama and K. Nishizawa, 2002, "Mass-production System of Nearly Monodisperse Diameter GEL Particles Using Droplets Formation in a Microchannel," Micro Total Analysis Systems, Nara, Japan, 3-7 Nov, vol.1, pp 368-370.
- 3) V. Srinivasan, V. Pamula, M. Pollack and R. Fair, 2003, "A digital microfluidic biosensor for multianalyte detection," Proceedings of the IEEE 16th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 327-330
- 4) P. Paik, V. K. Pamula, M. G. Pollack and R. B. Fair, 2003, "Electrowetting-based droplet mixers for microfluidic systems," Lab on a Chip, vol 3, pp. 28-33.
- 5) T. Thorsen, R. W. Roberts, F. H. Arnold and S. R. Quake, 2001, "Dynamic Pattern Formation in a Vesicle-Generating Microfluidic Device," Physical Review Letters, Vol.86, pp 4163-4166.
- 6) J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe and R. J. Adrian, 1998, "A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics," Experiments in Fluids, Vol. 25 (4), pp. 316-319.
- 7) C. D. Meinhart, S. T. Wereley and J. G. Santiago, 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," Experiments in Fluids, Vol. 27, pp. 414-419.
- 8) A. G. Koutsiaris, D. S. Mathioulakis and S. Tsangaris, 1999, "Microscope PIV for Velocity-field Measurement of Particle Suspensions Flowing Inside Glass Capillaried," Meas. Sci & Tech., Vol. 10, pp. 1037-1046.